

粳の高周波乾燥に関する研究 (第2報)

マイクロ波による粳の連続乾燥

上出 順一・土屋 功位・佐々木 央

(山形大学農学部農業機械学研究室)

(昭和54年9月3日受理)

Studies on the Drying of Rough Rices with High-Frequency II
Continuous Drying Characteristics of Rough Rices with Microwave

Junichi KAMIDE, Masanori TSUCHIYA and Hisashi SASAKI

Laboratory of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture,
Yamagata University

(Received September 3, 1979)

I. 緒 言

高周波電場内に物体を入れると、その誘電体損によって、内部から一様に加熱される。したがって粳の高周波乾燥においては内部から表面への水分移動は内部高の温度勾配によるので、水分の移動速度は、水分勾配による拡散移動が支配的な熱風乾燥の場合よりも速く、また粒内の水分勾配、あるいは乾燥が進むにつれて粳に吸収されるエネルギーが減少するなどの特性から乾燥における高周波利用の有効性が報告されている¹⁾²⁾⁴⁾⁶⁾。

第1報においてはバッチ方式により、高水分粳のマイクロ波による乾燥特性について実験を行ったが、本報では連続乾燥においてマイクロ波パワー、粳流量、含水率を異にした場合の粳の乾燥特性を明かにし、併せて熱風乾燥機との比較検討を行ったものである。

II. 実 験 方 法

1. 実験装置

実験装置は第1報のものと同じであるが、本実験では連続的に乾燥を行った。粳は上部ホッパーから加熱室に入って加熱され、さらに乾燥室を通過して流下する。粳流量は加熱室および乾燥室の下部にある粳線出しロールの回転速度によって変えられる。加熱室および乾燥室の容量は5.2 l (23×38×6) および4 lで、加熱室には約4 kgの粳が入る。

加熱室で、粳から出る水分を除去するため通風を行ったが、熱的影響をできるだけ小さくするため通風量は0.3 m³/min程度とした。乾燥室は粳線出しロールによってマイクロ波から遮断されている。ここには加熱室で温められた粳が入ってきて、通風によって乾燥が促進される。乾燥室の通風量は0.62 m³/minである。

2. マイクロ波発生装置

T社製電子レンジ ER-1002 を使用した。導波管によってマイクロ波 (2450±50 MHz) を加熱室背部に導き、スタラーファンによって加熱室に散乱照射する。

マイクロ波出力はスライダックによってマグネトロンのアノード電流を変え、0.73, 1.14 および1.61 kw に変化させた。

3. 測定法

(1) 温度; 実験室内の乾・湿球温度, 加熱室および乾燥室への送風温度は水銀温度計で測定した。また, 加熱室, 乾燥室から排出される通気の乾球および湿球温度, および糲温はサーミスタで測定し, 打点式記録計に自記させた。糲温は加熱室および乾燥室の下端中央部, すなわち各室の排出口近くに針型サーミスタを挿入して測定した。

(2) 含水率; 試料を十分に攪拌した後にサンプリングし, 10g粒—105°C—24h 法によって測定し, 含水率は湿量基準で表わした。

(3) 胴割; 1回の実験につき100粒以上をサンプリングし, 24時間を経過した後に糲を手で脱稈し, 肉眼判定した。分級は穀物検査基準により, 重胴割のみを胴割粒とした。

(4) 加熱および乾燥時間; 加熱時間は糲が加熱室に流入してから排出されるまでの時間であり, 乾燥時間は加熱室と乾燥室の通過所要時間で表わした。乾燥時間は加熱時間のほぼ2倍である。

4. 熱量計算

糲乾燥に必要な熱量はマイクロ波および通風によって与えられるが, 通風量は少く, その熱的効果はマイクロ波よりかなり小さいのでこれを無視し, 熱効率等の計算においてはマイクロ波が唯一の供給熱源とみなした。マイクロ波出力の測定は, 全水負荷—2分間照射法⁷⁾すなわち2kgの水に2分間マイクロ波を吸収させ, その熱量から求め, 乾燥熱効率の計算では吸収マイクロ波出力を基準とした。

5. 供試糲

山形大学農学部附属農場で生産された自脱コンバイン収穫糲で, 品種はキヨニシキである。多くは収穫直後の生糲を供試したが, 高水分の実験材料は, 生糲をさらに24時間浸水した後室内で水分を調整したものを用いた。また実験に先立って風選により糲, わらくず等をできるだけ除去した。

III. 結果および考察

1. 加熱時間と乾燥特性

糲繰出しロールの回転速度を変えると糲の流下速度(流量)が変わり, 加熱時間が変化する。糲流量と加熱時間の関係は48kg/hで加熱5分, 12kg/hで加熱20分であった。Fig. 1に加熱時間と加熱室内での糲温の関係を示す。糲温は加熱室下端における値であり, マイクロ波加熱による糲の最高温度とみなされる。加熱時間と糲温の関係はバッチ方式¹⁾の場合と同じ傾向であり, マイクロ波出力が大きく, また低水分糲ほど糲温度は高かった。高水分糲ほどマイクロ波エネルギーの吸収は大きい, 蒸発水分量が多くなるため, その多くは水分蒸発熱に消費されるので顕熱部分が小さくなると考えられる。

含水率18.3%の糲では, 1.14kw—15分間加熱で糲温は100°C近くにもなり, また27%の糲でも70°Cを越した。このことからみて, マイクロ波乾燥では糲温上昇の面から1つの制限を受けよう。穀物種子は60°C以上に加熱すると発芽率等の生物的性質に大きな影響を及ぼす⁵⁾ので, 本実験結果によると, たとえば含水率27%の糲では, 出力1.14kwで10分, 0.73kwで20分以上の加熱は避けなければならない。加熱室を出た糲は乾燥室に入ってさらに乾燥が行われた後に排出されるが, この時の糲温はほぼ室温まで低下していた。Fig. 2に加熱時間と毎時乾減率の関係を示す。乾減率は高出力, 高水分糲ほど大きく

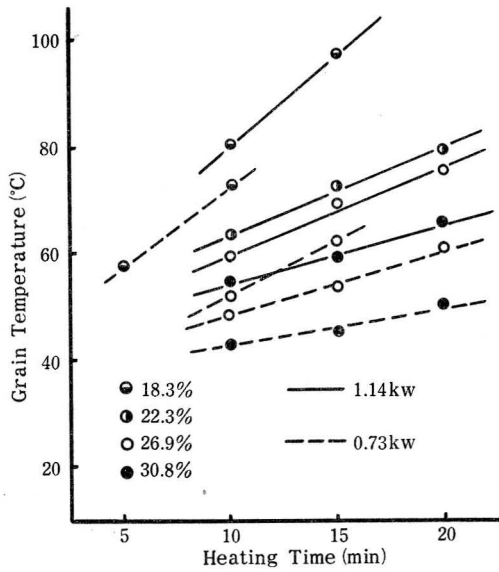


Fig. 1. Relations between grain temperature and heating time.

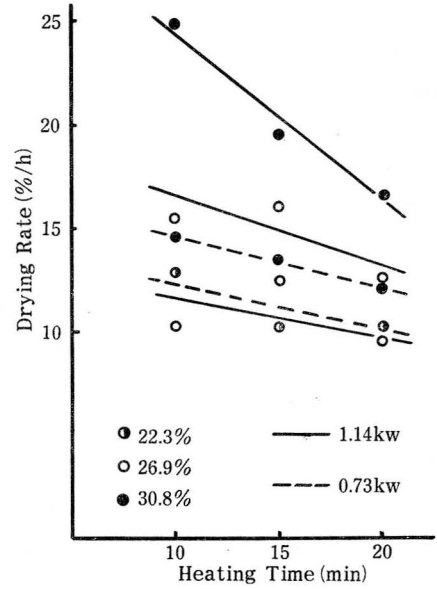


Fig. 2. Relations between drying rate and heating time.

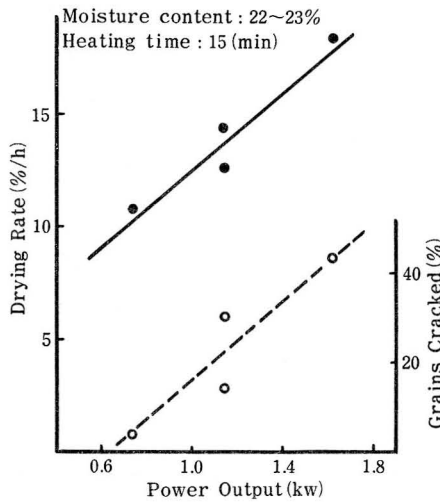


Fig. 3. Effects of drying rate and grains cracking on power output of microwave.

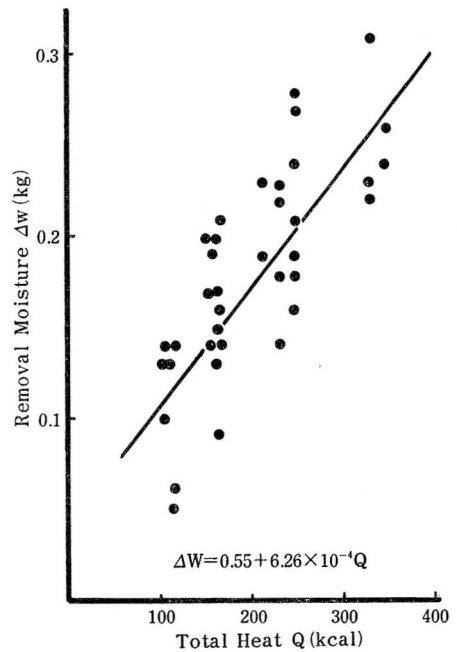


Fig. 4. Relations between moisture removed from rough rices and total heat supplied.

10~20%/h の範囲にあったが、バッチ式乾燥と異り加熱時間の長い場合に乾減率は低下した。これは乾燥室での通風による熱的損失が加熱時間の長い高温の籾で大きかったためと考えられる。このことは加熱時間が増すと乾燥熱効率が低下したことから

いえる。

Fig. 3 は籾含水率および加熱時間が一定の場合のマイクロ波出力と乾減率および胴割の関係を示したものであるが、乾減率、胴割ともマイクロ波出力の増大に伴ってほぼ直線的に増加し、バッチ式の場合と同じような傾向を示した。

2. 総加熱量と乾燥特性

乾燥速度はマイクロ波出力、籾含水率、加熱時間によって異なるが、とくに出力の影響が大きい。乾減水分量は加えられた総熱量によってきまり、Fig. 4 に示すように両者の間にはほぼ直線関係があった。

加熱量 1 kcal 当り平均乾減水分は 0.94g であったが、含水率が高いほど乾減水分量は多くなり、含水率30%程度の高水分籾では 1.14g であった。単位熱量当り乾減水分量はバッチ式よりもおよそ15%多かったが、乾燥室での乾燥が効果的に行われたことを示している。ところで加熱量が多く、乾減率が大きくなると Fig. 5 に示すように急激な胴割の増加がみられた。Fig. 5 によると胴割の増加傾向はバッチ式の場合と同じであり、籾温の高い低水分籾で胴割が多かったが、加熱中の籾温上昇が胴割に大きく係っていると考えられる。なお含水率30%の高水分籾では、実験の範囲で胴割の発生はみられなかった。

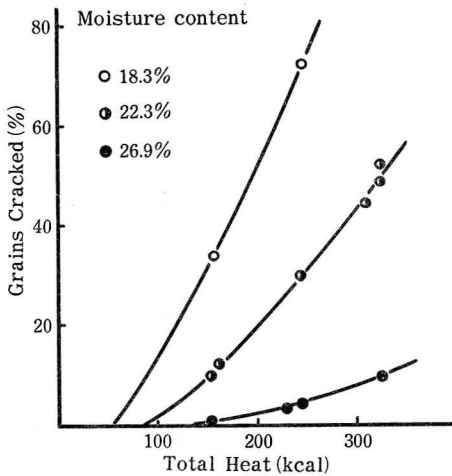


Fig. 5. Effects of paddy grain cracking on total heat supplied.

3. 許容熱量

籾を速く乾燥させるにはマイクロ波出力を高め、また加熱時間を長くすればよいが、加熱量が大きくなると胴割発生が問題となる。被害粒としての胴割を一定量に抑えるためには1行程で籾に加える熱量を制限しなければならない。

Fig. 6 は、Fig. 5 の結果から、籾含水率と許容熱量の関係を求めたものである。単位籾当りの許容熱量は、高水分籾ほど大きく、いま胴割を5%まで許容すると含水率18.3%、22.7% および 26.9% の籾ではそれぞれ 18.8kcal、32kcal および 65kcal であった。また胴

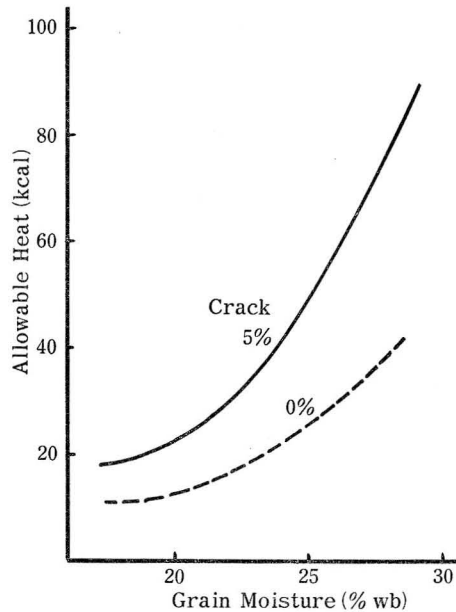


Fig. 6. Relations between allowable heat supplied and grain moisture at different grain cracking levels.

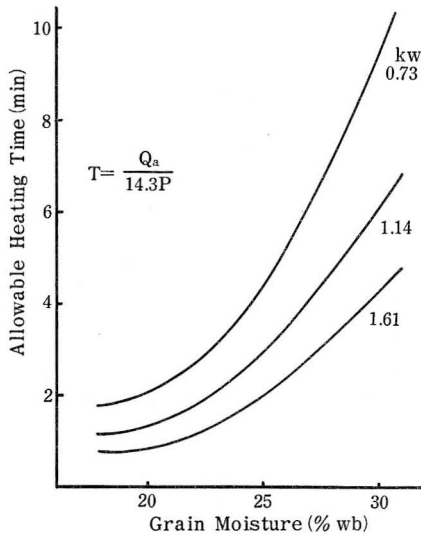


Fig. 7. Relations between allowable heating time and grain moisture at different microwave power.

割の発生を0%に抑える場合の許容熱量は上記含水率の籾で 11.3kcal, 18.8kcal および 31.3kcal となる。

許容熱量 Q_a が与えられるとマイクロ波出力に対応する加熱時間が求まる。1kw = 14.3kcal/min であるから、加熱時間 T は次式で表わされる。

$$T = \frac{VQ_a}{14.3P} \text{ (min)} \dots\dots\dots(1)$$

ここで P : マイクロ波出力(kw)

V : 加熱室の容量(kg)

また籾流量は次式で求まる。

$$U = \frac{V}{T} = \frac{14.3P}{Q_a} \text{ (kg/min)} \dots\dots\dots(2)$$

Fig. 7 は籾含水率と許容加熱時間の関係をマイクロ波出力をパラメーターとして示したものである。胴割からみた許容加熱時間は籾温を 60°C 以下にとどめるためのそ

れよりも短い。

4. 所要熱量および乾燥熱効率

マイクロ波エネルギーの大部分は籾に吸収され、籾温上昇および水分蒸発に消費されるが、ほかに通風によって持去られる熱損失、さらに放射、伝導による損失がある。加熱室における水分蒸発熱および籾温上昇熱は次によって計算される。

$$q_1 = \Delta W_1 q_c \text{ (kcal)} \dots\dots\dots(3)$$

ここで ΔW_1 : 蒸発水分量(kg)

q_c : 水分蒸発潜熱(kcal/kg)

$$q_2 = C_s G (t_2 - t_1) \text{ (kcal)} \dots\dots\dots(4)$$

ここで C_s : 籾の比熱(kcal/kg·°C)

G : 籾重量(kg)

t_1 : 籾の初期温度(°C)

t_2 : 籾の最高温度(°C)

ところで加熱室で t_2 に温度の高められた籾は乾燥室に入り、その余熱によってさらに乾燥が進む。この間に熱的損失がないものとする乾燥水分量は次式で求められるが、実際にはかなりの熱は通風によって持去られるので ΔW_2 より少い。

$$\Delta W_2 = \frac{C_s G (t_2 - t_3)}{q_c} \text{ (kg)} \dots\dots\dots(5)$$

ここで t_3 : 排出時の籾温度(°C)

通風空気、加熱室および乾燥室のそれぞれの入・排気口における絶対湿度の変化から、乾燥水分量を計算すると、乾燥室での乾燥水分 $\Delta W'_2$ は総乾燥水分 ΔW のほぼ 10~25%の範囲にあった。

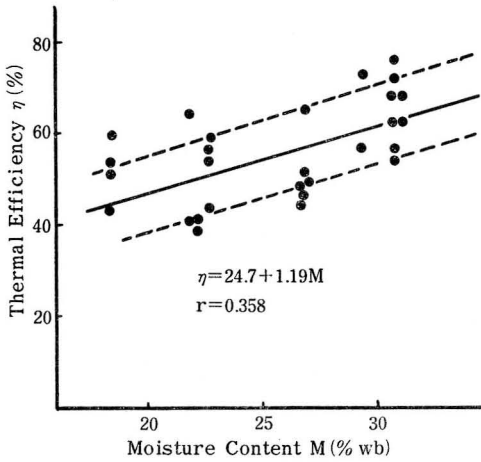


Fig. 8. Effects of thermal efficiency on grain moisture in the continuous drying with microwave.

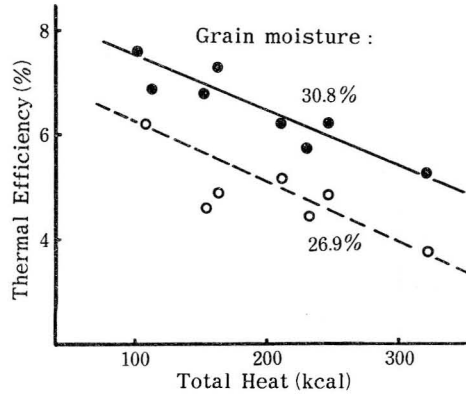


Fig. 9. Relations between thermal efficiency and total heat supplied.

籾に吸収されたマイクロ波のうち有効に水分蒸発にあずかったエネルギーは次式で求められる。

$$q = (\Delta W_1 + \Delta W'_2)q_c = \Delta Wq_c \text{ (kcal)} \dots\dots\dots(6)$$

乾燥における熱効率を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。乾燥熱効率は前述のように全水負荷の場合の吸収エネルギー q_0 を基準とし、次式によって計算した。

$$\eta = \frac{q}{q_0} \times 100 (\%) \dots\dots\dots(7)$$

乾燥熱効率 η は 40~75% の範囲にあったが、高水分籾ほど高く、そして加熱量が多くなるほど低下した。

籾乾燥において初期含水率および乾後含水率がわかると乾燥に必要な熱量が計算で求められる。乾燥熱効率は籾含水率によって変化するのでこれを考慮し、含水率 M% の単位量の籾を含水率 15% まで乾燥する場合の所要熱量を計算すると次式を得た。

$$Q = 12.2M - 16.8 \text{ (kcal/kg)} \dots\dots\dots(8)$$

これから籾含水率別に各マイクロ波出力に対応する乾燥能率を求めたのが Fig. 10 である。ところで胴割発生的一面から 1 行程当り加熱量に制限をうけるので、胴割を 5% まで許容するとすれば乾燥処理は 2~3 行程に分けて行わなければならない。また胴割増加を 0% に抑えて乾燥を行うには 4~6 行程に分ける必要がある。

5. 熱風乾燥とマイクロ波乾燥の比較

Table 1 に熱風乾燥とマイクロ波乾燥の比較の一例を示す。熱風乾燥は既応の資料³⁾ および山形大学農学部附属農場における調査結果によるものである。なお熱的計算は直接に水分蒸発に関係するものについて行い、籾の循環、送風などの付帯的動力については省略した。熱風乾燥ではいずれも灯油が使用されていたが、これの低発熱量を 10350 kcal/kg として計算した。マイクロ波乾燥機は出力 1.61kw, 加熱室容量 4kg の小型実験機であり、熱風乾燥の実機と規模も違い、厳密な比較は出来ないが、両者の特徴は把握で

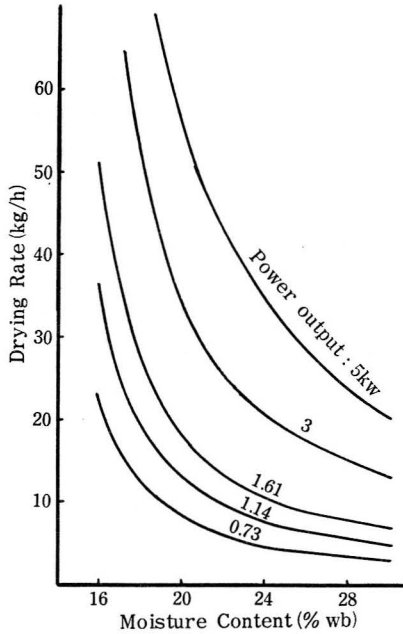


Fig. 10. Relations between drying rate and moisture content of rough rices at different microwave power.

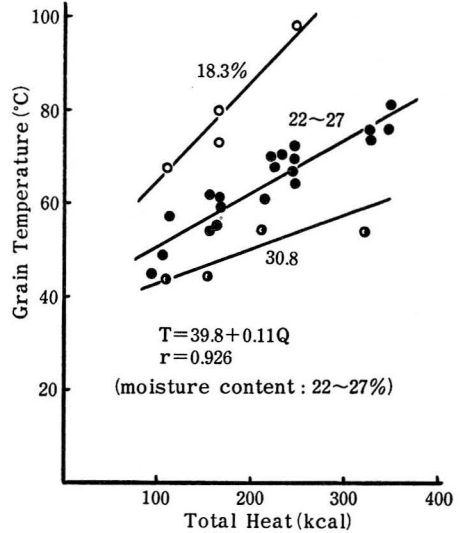


Fig. 11. Relations between grain temperature and total heat supplied.

Table 1. Comparison of hot-air dryers and a microwave dryer

番 号	機 種	①*	②	③	④	⑤	⑥
		K	K	O	S	M	マイクロ波
乾燥張込量	(kg)	3,200	1,260	1,220	960	1,360	4
籾水分 乾前	(%)	25.0	23.3	25.9	25.0	26.1	25.0
〃 乾後	(%)	15.0	14.9	14.6	14.4	15.3	15.0
乾燥時間	(h)	12.0	7.6	9.0	11.0	12.0	0.76**
毎時処理量	(kg/h)	266.7	165.7	135.7	87.2	113.3	10.4
毎時乾減率	(%/h)	0.83	1.11	1.26	0.96	0.9	13.2
燃料消費量	(kg)	30.0	12.6	11.7	11.4	18.2	—
毎分発熱量	(kcal/min)	431.3	286.0	224.3	178.8	261.6	23.1
平均通風温度	(°C)	52.0	40.2	43.1	44.0	39.6	—
発熱量電力換算	(kw)	30.1	19.9	15.6	12.5	18.2	1.61
籾1kg 1%乾減所要熱量	(kcal/kg%)	9.7	12.3	8.8	11.8	12.8	13.4
熱効率	(%)	68.7	53.4	67.8	57.5	52.9	49.9

* 農学部附属農場

** 加熱時間は0.38h

きよう。マイクロ波乾燥によって仕上まで継続乾燥を行う場合の毎時乾減率は13%/h程度で、熱風乾燥のおよそ10倍であるが、胴割発生の危険があり、数行程に分けて乾燥しなければならぬので実質的な乾減率はより低いものとなる。熱風乾燥での籾温は送風空

気温度によってコントロールされるが、マイクロ波乾燥では内部加熱であり、加えられる熱量によって、すなわち低出力であっても加熱時間が長ければ糊温は次第に高くなってゆくの、外部からのコントロールは難かしいのが一つの問題であろう。単位糊の単位乾減率当りの加熱量は熱風乾燥よりもマイクロ波乾燥で多く要しており、そして乾燥熱効率もマイクロ波で低かった。さらにマイクロ波発振管の出力効率は数十%である⁷⁾ので実際の乾燥熱効率はかなり低くなる。

IV. 摘 要

マイクロ波利用による糊の連続乾燥における特性を実験的に明かにし、さらに熱風乾燥法との比較を行った。実験装置は前報のものと同じであり加熱室容量は5.2lで、約4kgの糊が入る。以下に要約を列記する。

1. 加熱時間が長くなると糊温はほぼ直線的に増大したが、乾減率はバッチ式の場合と異なり若干低下した。なお糊温の上昇は高水分糊より低水分糊で高かった。乾減率はバッチ式の場合と同様に糊の水分含有率が高いほど、そしてマイクロ波出力が大きいほど大きかった。
2. 乾減水分は加えられた熱量にほぼ比例して増大し、胴割も加熱量が増すほど増加した。
3. 胴割率からみて、連続して加え得る熱量には限度があり、胴割率5%以内の許容熱量は、糊水分によっても異なり、18.3%糊で18.8kcal/kg、22.7%糊で32kcal/kg、26.9%糊で65kcal/kgであった。したがってマイクロ波乾燥では数行程に分けて行う必要がある。
4. 乾燥室における乾減水分量は全体の10~25%であった。連続乾燥における熱効率は40~75%の範囲にあり、バッチ式のそれより大きかった。
5. マイクロ波乾燥の乾減速度は熱風乾燥より大きい、熱効率は低かった。マイクロ波乾燥では胴割発生の原因の1つである糊温のコントロールが困難であるのが問題である。

参 考 文 献

- 1) 上出順一, 土屋功位: 糊の高周波乾燥に関する研究(第1報), 山形大学紀要(農)第7巻 第3号, (1976)
- 2) Malcolm E. Wright and Jay G. Porterfield: Heating and drying peanuts with radio-frequency energy. Trans. A. S. A. E. 14(4), (1971)
- 3) 丸山 篤: 循環式乾燥機, 新潟県農業試験場, (1973)
- 4) 西山喜雄, 細川 明, 佐々木 昭: 高周波の農産物への応用(1), 第28回農機学会講演要旨, (1969)
- 5) 農業機械学会: 農業機械ハンドブック, コロナ社, (1969)
- 6) Stetson, L. E. and S. O. Nelson: Effectiveness of hot-air, 39-MHz dielectric, and 2450-MHz microwave heating for hard-seed reduction in alfalfa. Trans. A. S. A. E. 15(3), (1972)
- 7) 吉村順一: 高周波加熱用電子管発振装置の設計と調整, 誠文堂新光社, (1967)

Summary

In this paper, the authors investigated experimentally the continuous drying characteristics of rough rices with microwave, and compared the performance of a microwave dryer with hot-air dryers. The apparatus used was same as reported in the previous paper, the capacity of the heating-chamber of it was 5.2 liter and filled with about 4 kg of rough rices.

The conclusions were the following :

1. The grain temperature increased with heating time. At constant heating time and microwave power, the lower the grain moisture, the higher the grain temperature.
2. The average drying rate decreased with heating time, that was in reverse tendency in the batch drying. The moisture removed from rough rices increased proportionally with the heat supplied.
3. The more the heat supplied, the more the grain cracked. To minimize the crack of grains, the amount of heat supplied in one run should be within the limit which was different in various grain moisture. Allowable heat was 18.8kcal, 32kcal and 65kcal at 18.3%, 22.7% and 26.9% of grain moisture respectively.
4. The removal moisture in the drying chamber was in the range of 10~25% of the total moisture removed from grains. The thermal efficiency of the microwave dryer was lower than those of hot-air dryers.